中国生态农业学报 2017 年 3 月 第 25 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2017, 25(3): 419−428

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160342

卜坤, 王治良, 张树文, 杨久春. 三江平原大豆种植的土地适宜性评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 419−428
Bu K, Wang Z L, Zhang S W, Yang J C. Evaluation of agricultural land suitability for soybean cultivation in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 419−428

三江平原大豆种植的土地适宜性评价*

卜 坤[1], 王治良[2,3**], 张树文[1], 杨久春[1]

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 长春 130012; 2. 齐齐哈尔大学理学院 齐齐哈尔 161006; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101)

摘 要: 受全球气候变化、二氧化碳施肥效应以及市场需求的影响, 国内一系列旨在促进大豆种植的政策, 可能导致三江平原大豆种植面积的增加。在此大背景下, 充分利用当地气候条件和肥厚的土壤资源, 促进农业用地的合理配置的关键问题在于对大豆种植进行土地适宜性评价。作者依据 FAO/IIASA 发布的 GAEZ 研究框架: 首先根据大豆对气候、土壤的需求, 对三江平原气象资料进行气候清查, 评价大豆种植的气候适宜性; 再考虑地形因素对气候条件的影响, 使用 Fourier 指数和坡度条件对评价结果进行修正; 然后, 进行土壤清查, 选取土层厚度、质地、pH、排水级与淹水情况等作为评价指标, 对三江平原大豆种植进行土壤适宜性评价, 并对含白浆层的各类土壤进行适宜性降级处理; 最后, 在栅格像元尺度上进行图层叠加, 得到三江平原大豆种植的土地适宜性评价结果。另外引入了适宜度指数(S_I), 对三江平原 23 个县市大豆种植的土地适宜度进行了空间上的比较。结果表明: (1)除了坡度大于 30%的山区外, 三江平原大部地区适宜大豆种植, 面积达 8.5×10^4 km^2, 约占总面积的 78.75%; (2)沿松花江、倭肯河、穆棱河等两岸的平缓(2%~5%)和微起伏(5%~8%)地区, 土壤质地和排水状况良好, 最适宜大豆种植; (3)勃利、依兰、汤原、佳木斯、集贤、桦川、友谊、绥滨和富锦 9 个县市, 适宜度指数均超过 70%; 其次是同江、桦南、虎林、宝清、抚远、七台河、萝北、鸡东、饶河和双鸭山 10 个县市; 鹤岗、密山、鸡西、穆棱 4 县市, 适宜度一般; (4)GAEZ 模型流程化评价方法能够在区域尺度上有效实现大豆种植适宜性的空间差异分析, 为土地资源的合理配置提供科学依据。

关键词: GAEZ 模型; 大豆种植; 土地适宜性; 三江平原
中图分类号: S314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0419-10

Evaluation of agricultural land suitability for soybean cultivation in the Sanjiang Plain, Northeast China*

BU Kun[1], WANG Zhiliang[2,3**], ZHANG Shuwen[1], YANG Jiuchun[1]

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. College of Science, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences / Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Sanjiang Plain is one of the most important grain production base in China. The importance of the plain could increase

* 国家自然科学基金项目(41301510)、国家科技基础性工作专项(2011FY110400, 2013FY114600)、齐齐哈尔市科技局软课题(RKX-201406)和黑龙江省哲学社会科学研究规划青年项目(16JLC01)资助
** 通讯作者: 王治良, 主要研究方向为资源环境遥感调查与评估。E-mail: jodver@163.com
卜坤, 主要研究方向为 GIS 开发与应用。E-mail: bukun@osgeo.cn
收稿日期: 2016-04-19 接受日期: 2016-11-09

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41301510), the National Program on Basic Research Project of China (2011FY110400, 2013FY114600), the Soft Scientific Topics of Qiqihar Science and Technology Bureau (RKX-201406), and the Philosophy and Social Sciences Research Plan of Heilongjiang Province (16JLC01).
** Corresponding author, E-mail: jodver@163.com
Received Apr. 19, 2016; accepted Nov. 9, 2016

with the promulgation of policies that encourage farmers to cultivate soybean to adapt to the global climate change and CO_2 concentration rise. In order to make full use of the advantages in climate and soil conditions, there is the need for rational allocation of soybean cultivation areas in the Sanjiang Plain. In this paper, firstly, we carried out climate suitability evaluation for the cultivation of soybean based on climate and soil inventory with the GAEZ framework of FAO/IIASA. Then, we used soil thickness, soil texture, soil pH, land drainage and flooding conditions as indicators of soil suitability evaluation and the results of the analysis were degraded by Albic bleach soil in the Sanjiang Plain. Finally, the results of the agricultural land suitability evaluation were obtained by overlapping layers in GIS at the grid scale (30 m × 30 m) and Suitability Index (S_I) calculated to geospatially compare soybean cultivation in the study area. The results showed that: 1) most parts of the Sanjiang Plain was suitable for soybean cultivation, except for areas with slope ≥ 30%. 2) About 8.5 × 10^4 km^2 (78.75% of the plain) was suitable for soybean cultivation, especially gentle slope (2%–5%) and undulating slope (5%–8%) areas along the bank of Songhua, Woken and Muleng Rivers with good soil texture and high drainage. 3) Nine counties with the highest S_I (≥ 70%) included Boli, Yilan, Tangyuan, Jamusi, Jixian, Huachuan, Youyi, Suibin and Fujin. Then 10 counties (Tongjiang, Huanan, Hulin, Baoqing, Fuyuan, Qitaihe, Luobei, Jidong, Raohe and Shuangyashan) had higher S_I (60%–70%); Hegang, Mishan, Jixi and Muleng counties had the lowest S_I (S_I ≤ 60%). 4) For its simple and objective evaluation procedure, the GAEZ framework was applicable in locally distinguishing spatial differences in soybean cultivation areas needed in rational land allocation.

Keywords: GAEZ model; Soybean cultivation; Land ecological suitability; Sanjiang Plain

随着我国国民生活水平的提高，对非转基因食用植物油和肉禽蛋奶等农畜产品的需求日益强劲，大大地刺激了大豆(*Glycine max*)压榨加工业的快速发展，导致国内大豆需求量的急剧膨胀。张振华等[1] 2009 年分析并预测了我国 2020 年大豆供需缺口将达到 1.38×10^8 t，可见未来几年我国大豆供需缺口将不断扩大。作为大豆主产区，黑龙江省三江平原大豆生产潜力位居全国首位[2-3]。随着气候暖干化趋势加剧[4]，未来全球气候变化及 CO_2 浓度升高的肥效作用可能对黑龙江省大豆生产产生有利影响[5]。为了充分发挥三江平原的气候、土壤资源优势，对其大豆种植进行农业土地适宜性评价，指导当地农业生产和土地资源的合理配置，具有重要的现实意义。

对于黑龙江省大豆种植用地适宜性评价，刘东辉[6]1991 年建立了大豆气候适宜性评价指标体系。随着评价技术手段的发展，近年来刘丹等[7]、何英彬等[8]、李竑积等[9]分别采用层次分析法、模糊数学等方法对黑龙江省大豆种植生态适宜性进行了评价，并利用 GIS 技术对种植区进行了合理地划分。但评价指标体系方法，主观性影响大，各指标权重大都以专家打分的方式获得，针对不同区域其评价指标体系也各异。20 世纪末，联合国粮农组织(FAO)和国际应用系统分析所(IIASA)共同研发了农业生态区划(agro-ecological zone，AEZ)模型，并被各国广泛用于评估本国的土地生产潜力[10-11]。2009 年，IIASA 推出了该模型的最新版本 Global AEZ(GAZE 3.0)，由于其计算过程严谨，机理性强，已成为目前对气候条件变化和农作物产量变化间关系表达最好的模型之一，已被大量应用于相关研究[3,12-16]。但模型研究尺度多以全球、洲际或国家尺度为主，缺乏在典型研究区针对气候变化如何影响土地生产力的研究[17]。本文选取三江平原为研究靶区，在区域尺度上探讨 GAZE 模型在大豆种植土地适宜性评价上的应用，为三江平原农业生产、土地资源的合理配置和可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

三江平原位于中国东北隅，黑龙江省的东部，是由黑龙江、松花江、乌苏里江冲积而成的低平原和完达山以南乌苏里江及其支流与兴凯湖形成的冲积湖积平原组成(129°11′20″E~135°05′10″E，43°49′55″N~48°27′40″N)，面积为 10.8×10^4 km^2。三江平原具有典型的河谷平原特点，除西部和西南部边界的小兴安岭、老爷岭、张广才岭和横亘中部的完达山为森林覆盖的山区外，其他地区主要分布有广阔的冲积平原和河流阶地。河漫滩上广泛发育着沼泽和沼泽化草甸，土壤成土母质多为黏土或亚黏土，在土壤形成过程中广泛发育了暗棕壤、黑土、白浆土、草甸土、沼泽土、泥炭土、石质土、新积土和水稻土 9 种类型。

三江平原属温带湿润半湿润大陆性季风气候，年平均降水量为 500~600 mm，区域多年降水量为 556 mm。冬、春季降水少，夏、秋季雨水丰沛，6~9 月降水总量为 400 mm 左右，占全年降水量的 70%以上。水面、陆面蒸发分别为 750~850 mm 和 300~500 mm；10 ℃以上积温为 2 400~2 700 ℃。土地资源丰富，雨热同季，适宜小麦(*Triticum aestivum*)、大豆、玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza sativa*)等多种作物生长。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

本研究用到的数据主要有三江平原的气象数据、土壤数据以及 DEM 数据等。

气象数据来源于黑龙江省气象局提供的1971—2010年三江平原及邻接各县市20个气象观测站点的逐日观测数据，包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、风速、光照时间和云量等7个指标。

土壤数据的来源是《黑龙江土壤》提供的《黑龙江省土壤图》[18]。首先，将纸质的《黑龙江省土壤图》三江平原部分依次进行扫描数字化、几何校正、土壤图斑矢量化，以土类为成图单元，得到三江平原土壤图；再次，通过对三江平原各种土壤资料的收集、整理与分析(如表 1)，按土类赋上相应属性(包括土壤类型 A 层土壤厚度、质地、有机质含量、pH 以及土壤容重等数据)，生成研究区土壤类型矢量数据。

表 1　三江平原各类型土壤的理化性质

Table 1　Physicochemical properties of different soil types in the Sanjiang Plain

土类 Soil type	A 层土壤厚度 Thickness of layer A (cm)	土壤质地 Soil texture	有机质含量 Organic content ($g\cdot kg^{-1}$)	pH	土壤容重 Soil bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)
暗棕壤　Dark brown soil	19.60	砂质、粉砂质壤土 Sand, silt soil	58.4	6.03	1.25
草甸土　Meadow soil	32.00	黏壤土、粉砂质壤土　Clay, silt soil	52.4	6.64	1.33
白浆土　Albic bleached soil	18.67	黏壤土　Clay soil	60.2	5.84	1.34
沼泽土　Bog soil	37.67	壤质黏土、黏壤土　Loamy clay soil	106.7	6.34	1.14
黑土　Black soil	50.00	壤质黏土、黏壤土　Loamy clay soil	43.2	6.10	1.31
水稻土　Paddy soil	30.00	壤质黏土　Loamy soil	28.2	—	1.34

DEM 数据来源于美国宇航局(NASA)和美国国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据，下载于 http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp。按研究区范围，利用 ArcGIS 软件拼接、填洼处理后，生成坡度、坡长等要素图件。

2.2　研究方法及评价流程

2.2.1　研究方法

农业生态区划方法(AEZ，agro-ecological zone methodology)，是 1977 年 Kassam 为联合国粮农组织(FAO)的农业生态区划研究项目制定的计算作物光温生产潜力的一种方法[19]。面对发展中国家 4~5 亿人口的营养不良和人口过度增长，FAO 试图通过 AEZ 研究项目的建立和实施来协助人类解决粮食安全问题。30 多年来，已经被用来解决许多全球性及区域性的问题，尤其是发展中国家，如中国、孟加拉国、泰国等的土地承载力、粮食生产、作物适宜性、水土流失退化问题，取得了良好的效果[20-22]。

2009 年，IIASA 推出了 AEZ 模型的最新版本 Global AEZ(GAEZ3.0)，该模型是在原有 AEZ 模型基础上改进了作物生产潜力模拟、土地适宜性评价和水分管理方式等计算过程，并对全球土壤和土地利用等数据进行了更新，关于 GAZE 模型的详细技术资料，参考相关文献[23-25]。但 GAEZ 模型作为一个应用于大尺度(国家、全球或大洲)的评价方法，针对具体小尺度区域，某些指标的设定不一定合理[26]。

相对于气候条件决定着植物在大范围内是否可以生存与适应[27]，农作物生长对气候、地形、土壤等立地条件具有选择性，不同立地环境下的作物生长具有差异性[28]，据此对农作物进行土地适宜性评价，一定程度上决定着评价模型的精度。GAEZ 模型能够详尽地给出土地适宜性评价的各种指标以及各种作物对不同的气候、地形、土壤等要素的适应范围，对于众多的科研工作者来讲，实际变成了一套土地评价的框架[25]。

2.2.2　评价流程

我们根据 GAEZ 方法的研究框架[29]，设计评价流程如图 1 示：首先根据大豆对气候、土壤的需求，对三江平原气象资料(热量、辐射、水分等)进行气候清查，评价大豆种植的气候适宜性；再考虑地形因素对气候条件的影响，使用 Fourier 指数和坡度对评价结果进行修正；通过土壤清查，合理选取土层厚度、质地、pH 值、排水级与淹水情况等作为评价指标，进行大豆种植的土壤适宜性评价；然后，针对具有限制性土层(白浆层)的各类土壤，将其适宜性评价级别降一级处理；最后，在栅格像元尺度上(30 m×30 m)，利用 GIS 技术对上述评价结果进行图层叠加，按适宜性最低级附像元值，最终得到三江平原大豆种植土地适宜性评价结果。

(1)气候适宜性评价

1)大豆品种及气候条件需求分析：大豆是短日照喜温作物，对温度有较宽的适应范围，对水分反

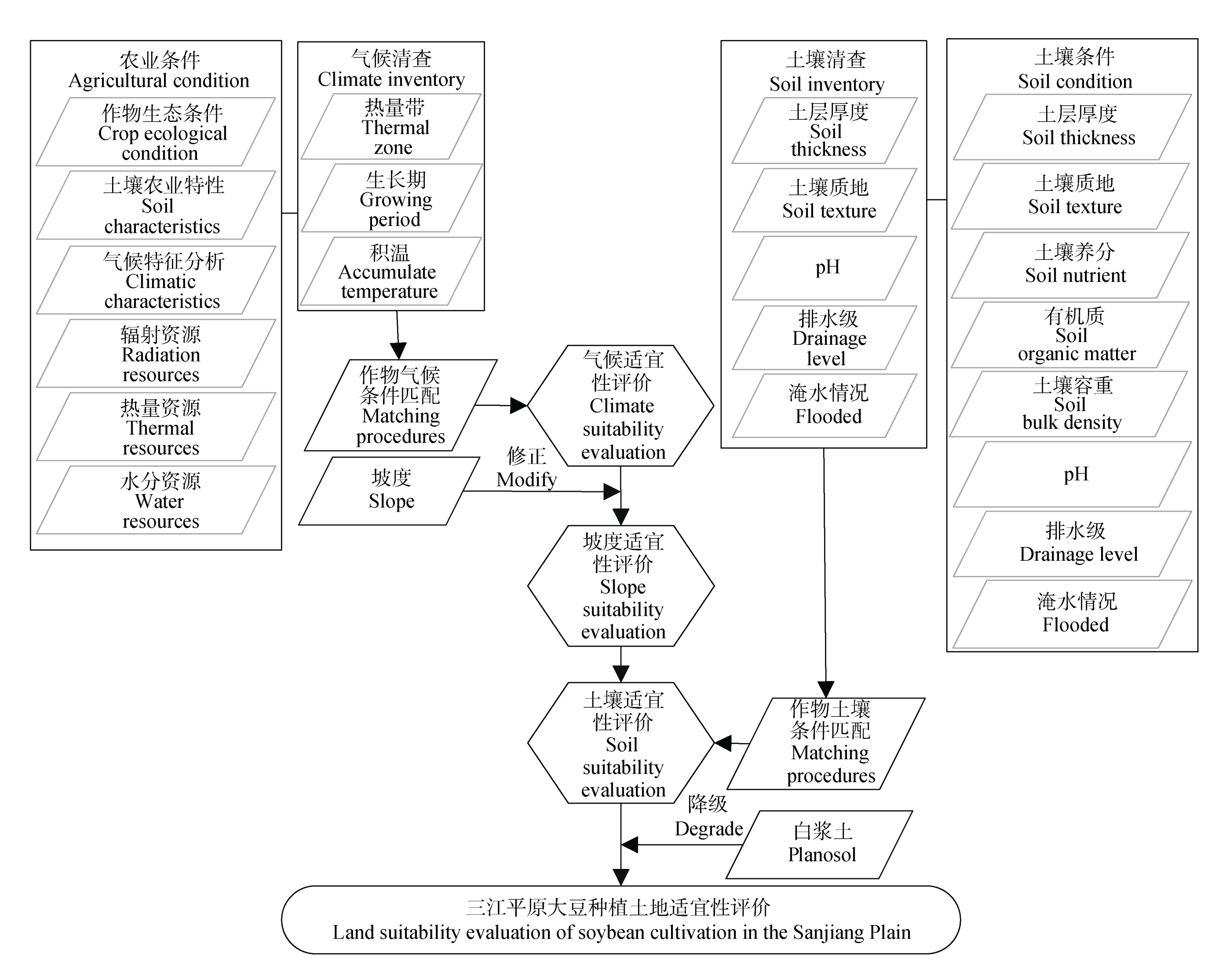


图 1　三江平原大豆种植农业土地适宜性评价流程图

Fig. 1　Flow chart of land suitability evaluation for soybean cultivation in the Sanjiang Plain

应敏感，是旱田作物中需水最多的作物。黑龙江省活动积温年际间差异较大，为了充分利用热量资源，高永刚等[30]对黑龙江省大豆主栽品种和新育品种的热量指标进行重新标定，以80%保证率下稳定通过8 ℃为各地播种期，以气温稳定通过10 ℃的终日或者日最低气温1 ℃霜冻出现日期(二者中的较早值)作为生长季结束的日期。据此研究发现，除了三江平原东北部稳定通过8 ℃积温在1 900~2 100 ℃·d，仅有少量品种可以成熟外，三江平原内大豆各品种广泛分布(表2)。

表 2　三江平原大豆品种及生长条件

Table 2　Varieties and growing conditions of soybean in the Sanjiang Plain

熟期组 Maturity group	品种 Soybean variety	生长期 Growth phase (d)	80%保证率≥8 ℃积温 ≥8 ℃ accumulated temperature (℃·d)
极早熟品种 Extremely early maturing	绥农 15、绥农 16、黑河 13、黑河 14 SN15, SN16, HH13, HH14	130~140	2 100~2 300
早熟品种 Early maturing	合丰 39、合丰 40、黑河 17、黑河 18、黑河 19 HF 39, HF40, HH17, HH18, HH19	140~150	2 300~2 500
中熟品种 Middle maturing	合丰 35、绥农 14、黑农 35、垦农 4 HF 35, SN14, HN35, KN4	150~155	2 500~2 700
中晚熟品种 Middle-late maturing	合丰 25、黑生 101、黑农 5088 HF25, HS101, HN5088	150~155	2 700~2 800
晚熟品种 Late maturing	黑农 38、黑农 41、绥农 10、东农 211 HN38, HN41, SN10, DN211	155~160	>2 800

根据宛敏渭等[31]1979年研究，黑龙江省主要农区80%保证率下稳定通过8 ℃的积温与稳定通过10 ℃的积温差平均值为70.6 ℃。一般习惯上，使用80%保证率下稳定通过10 ℃的积温和持续日数作为作物不同熟型的热量划分指标。本文为了兼顾使用习惯，按大豆生长期修正大豆气候适宜性评价指标，如下表 3。

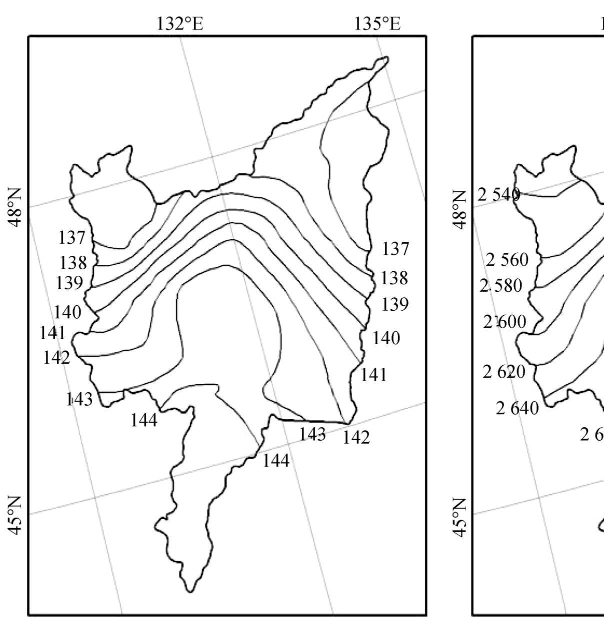
表 3　大豆各生长季气候适宜性评价指标
Table 3　Climate suitability evaluation indexes of soybean at different growth stages

适宜性 Suitability	温度 Temperature (℃)				需水量 Water demand (mm)				≥10 ℃积温 Accumulated temperature ≥10 ℃ (℃)
	出苗—拔节 Seedling–jointing	拔节—抽雄 Jointing–tasseling	抽雄—成熟 Tasseling–maturity	出苗—成熟 Seedling–maturity	出苗—拔节 Seedling–jointing	拔节—抽雄 Jointing–tasseling	抽雄—成熟 Tasseling–maturity	出苗—成熟 Seedling–maturity	
S_1	20~22	22~25	19~23	20~23	150~170	210~230	90~100	450~500	>2 500
S_2	22~23	25~26	23~24	23~24	170~190	230~260	100~110	500~560	2 200~2 500
	18~20	19~22	15~19	17~20	130~150	180~210	80~90	390~450	
S_3	23~24	26~27	24~25	24~25	190~230	260~320	110~130	560~680	2 000~2 200
	16~18	17~19	13~15	15~17	90~130	130~180	50~80	270~390	
N	>24	>27	>25	>25	>230	>2 320	>130	>680	<2 000
	<16	<17	<13	<15	<90	<130	<50	<270	

S_1 表示非常适宜; S_2 表示适宜; S_3 表示次适宜; S_4 表示边际适宜; N 表示不适宜。S_1: very suitable; S_2: suitable; S_3: moderately suitable; S_4: marginally suitable; N: not suitable.

通过气候清查，三江平原日平均气温稳定通过≥10 ℃的初终日数为 135~146 d(图 2 A)，积温在 2 411~2 778 ℃·d(图 2 B)，其分布均呈明显的由北向南依次增加的纬向分布趋势，同一纬度随着地形海拔高度而呈一定的垂直地带性[32]。可见，三江平原气候条件完全满足大豆生长需要。但在局部地区，因地形因素或不同气候年份造成的水分丰缺是大豆产量的决定因素。因此，大豆种植适宜性评价需要进行坡度和水分条件的修正。

2)坡度修正：在较大坡度上进行农业耕种，需要考虑上层土壤的侵蚀和土壤肥力的下降。不进行充分的保护措施将会导致土壤侵蚀的加速，严重影响可持续性农业生产。在相似的农作物覆被、土壤侵蚀度和农作物、土壤管理条件下，土壤侵蚀则主要取决于降雨的数量和强度。因此，在 GAEZ 方法中，通过建立不同的降水变率指数，分别对旱地和灌溉地的作物，应用不同的适宜性评价规则进行评价[33]。



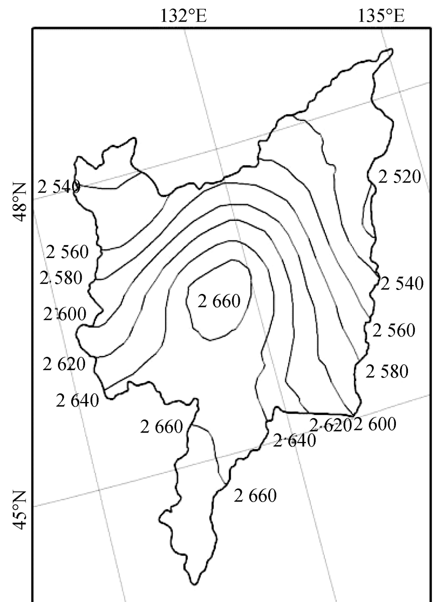


图 2　三江平原大豆生长期 10 ℃初终日数(d)等值线图(A)和 10 ℃以上积温(℃·d)等值线图(B)
Fig. 2　Isoline maps of duration (days) of temperature ≥10 ℃ (A) and accumulated temperature ≥10 ℃(℃·d) (B) in the Sanjiang Plain

为了利用已有数据，清晰地解释该区降雨总量和年内分布状况，利用修改了的 Fournier 指数来反映降雨总量和年内分布的联合影响[34]，如下式：

$$F_m = 12\sum_{i=1}^{12}\frac{P_i^2}{P_{ann}} \tag{1}$$

式中：F_m 为 Fournier 指数(无量纲)，P_i 表示月降水量，P_{ann} 表示年总降水量。F_m 的值表征了降水总量和降水的分布，并且限制在 $P_{ann} \leqslant F_m \leqslant 12P_{ann}$。在 GAEZ 方法中，$F_m$ 的结果被分成 6 类，即：$F_m \leqslant 1\ 300$、1 300~1 800、1 800~2 200、2 200~2 500、2 500~2 700 和

F_m>2 700，并且区分不同的投入水平。

本研究以中等投入进行分析，根据多年平均月降水情况计算的三江平原各个站点 Fournier 指数的空间化结果(图 3)，计算中只考虑了作物生长期 5—10 月份降雨时段的情况。

从图中可以看出，三江平原的 Fournier 指数可分为 F_m≤1 300 与 1 300<F_m≤1 800 两种情况，并结合 GAEZ 定义的 7 类坡度，对以降雨为主要影响因素的地表坡度进行分类等级划分(分级标准如表 4)；然后，在栅格像元尺度上，对大豆种植的坡度适宜性进行分级评价，评价结果如图 4。

(2)土壤适宜性评价

1)土壤适宜性评价指标：GAEZ 模型的农业-土壤适宜性分类系统，是依照 FAO′90 分类体系，在充分分析农作物对土壤的需求和主要土壤条件的基础上建立的。而本研究中使用的土壤数据来自于黑龙江省土壤普查数据，它所采用的土壤分类体系与 GAEZ 方法所采用的明显不同。因此，GAEZ 所提供的不同作物在不同土壤类型中的适宜情况，不能直接拿来作为三江平原土壤适宜性的评价标准。但可以采用 GAEZ 方法的评价框架和基本思想，以如下步骤进行三江平原大豆种植的土壤适宜性评价：

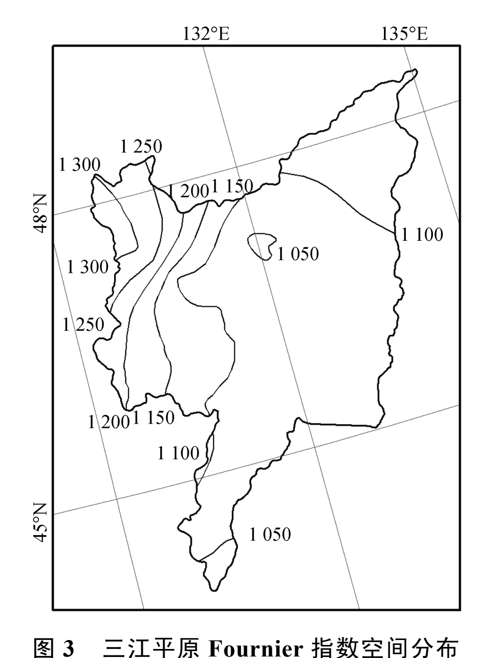


图 3　三江平原 Fournier 指数空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of Fournier index of the Sanjiang Plain

表 4　三江平原不同 Fournier 指数下大豆种植坡度适宜性分级标准

Table 4　Classification standards of suitability of slope for soybean cultivation with different Fournier indexes in the Sanjiang Plain

Fournier 指数(F_m) Fouriner index	项目 Item	坡度等级 Slope gradient class						
		平面 Flat	平缓 Gently sloping	微起伏 Undulating	起伏 Rolling	比较陡峭 Hilly	陡峭 Steep	非常陡峭 Very steep
F_m≤1 300	坡度 Slope (%)	0~2	2~5	5~8	8~16	16~30	30~45	>45
	大豆种植适宜性 Suitability of soybean planting	S_1	S_1	S_1	S_2	S_2	N	N
1 300<F_m≤1 800	坡度 Slope (%)	0~2	2~5	5~8	8~16	16~30	30~45	>45
	大豆种植适宜性 Suitability of soybean planting	S_1	S_1	S_1	S_2	S_4	N	N

S_1表示非常适宜；S_2表示适宜；S_3表示次适宜；S_4表示边际适宜；N 表示不适宜。S_1: very suitable; S_2: suitable; S_3: moderately suitable; S_4: marginally suitable; N: unsuitable.

首先，依据 FAO′90 的农业-土壤适宜性分类系统，确立与土壤相关的土层厚度(cm)、质地(A 层)、土壤容重(g·cm^{-3})、有机质含量(g·kg^{-1})、pH、排水级以及淹水情况 7 个指标，作为判定标准(表 5)。

再次，对三江平原各种土壤的属性进行统计分析，发现各种土壤类型的土壤容重以及土壤养分对本研究中的大豆种植都是适宜的。因此，在实际工作中只是针对土层厚度、质地、pH、排水级以及淹水情况进行了适宜级别的判定。

然后，根据实地情况，采用专家判断和半定量化的方法，确定作物对土壤条件的需求。表 5 为大豆的土壤条件需求，其中的数值是最佳及边界适宜时要求的土壤特性。

不同农作物在不同土壤类型上的适宜性评价，是将作物对土壤的需求与每一种土壤制图单元的对应性质相比较获取的，将其落到土壤类型图上，得到大豆种植的土壤适宜性分级图，如图 5。

2)土壤限制因素修正：GAEZ方法中其他要素的修正主要根据土壤中的粗粒物质和土相这两个因素。根据世界土壤图，GAEZ方法共区分了石质、石化碳酸钙、石化硫酸钙、石化铁化物、脆盘、硬盘、盐、碱等12种土相，来对农业土地适宜性进行修正。三江平原土壤质地较好，一般没有粗粒物质，只有白浆土的白浆层在某些地区是限制性土层。因此，针对凡具有对农业生产有限制作用的白浆层的各类土壤，将其适宜性级别降一级处理。

(3)土地适宜性评价

最后，在栅格像元尺度上(30 m×30 m)对上述评

表 5 大豆在最佳和适宜边界时对土壤条件的需求
Table 5 Demand of soybean to soil condition under optimal and appropriate margins

土壤条件 Soil condition	适宜级 Suitability	取值 Value	土壤条件 Soil condition	适宜级 Suitability	取值 Value
土壤厚度 Soil thickness (cm)	边界最小 Lowest margin	20	排水级 Drainage level	边界最小 Lowest margin	I
	适宜最小 Lowest suitability	50		适宜最小 Lowest suitability	MW
	适宜最大 Highest suitability			适宜最大 Highest suitability	W
	边界最大 Highest margin			边界最大 Highest margin	SE
质地 Soil texture	边界最小 Lowest margin	MS	淹水 Flooded	边界最小 Lowest margin	F1
	适宜最小 Lowest suitability	L		适宜最小 Lowest suitability	F0
	适宜最大 Highest suitability	CL		适宜最大 Highest suitability	F0
	边界最大 Highest margin	KC		边界最大 Highest margin	F1
pH	边界最小 Lowest margin	5.2			
	适宜最小 Lowest suitability	5.5			
	适宜最大 Highest suitability	7.3			
	边界最大 Highest margin	7.5			

MS: 中砂土; L: 壤土; CL: 黏壤土; KC: 高岭黏土。I: 不完全排水; MW: 中等良好排水; W: 良好排水; SE: 微过量排水。F0: 不淹水; F1: 偶然淹水。MS: moderately sand; L: loan; CL: clay loam; KC: Kaolin clay; I: imperfectly drained; MW: moderately well drained; W: well drained; SE: somewhat excessively drained; F0: mot drowned; F1: occasionally drowned.

价结果进行图层叠加，按适宜性最低级附像元值，最终得到三江平原大豆种植土地适宜性评价结果，如图 6。

为了更直观地表达不同县域之间大豆种植适宜性的空间差异，参照 GAEZ 给出的计算公式，给出适宜度指数 S_I 的计算方法，并统计得到三江平原 23 个县市大豆种植适宜度指数归一化分级图(如图 7)和统计结果(如图 8)。

$$S_I = \frac{S_1\times 9 + S_2\times 7 + S_3\times 5 + S_4\times 3}{A} \tag{2}$$

式中：S_I 为县域土地适宜度指数(无量纲)，A 为此县的面积(km^2)，S_i(i=1，2，3，4)为县域内大豆种植不同适宜性等级的面积(km^2)。

3 结果与分析

3.1 气候适宜性评价及坡度修正结果

农业生态区划(GAEZ)方法中，作物气候适宜性评价至关重要。通过气候清查，将大豆各生长阶段的气候需求与当地气候条件(热量带、生长期、积温等)进行匹配，然后对农业气候限制性因子(水分条件等)进行分析，按坡度适宜性分级标准修正大豆种植的气候适宜性评价结果，得到三江平原大豆种植地形适宜性评价分级图，如图 4。由图可见，三江平原内大部分地区适宜大豆生长，但因地形、水分条件等因素制约，如张广才岭、完达山、长白山和小兴安岭余脉坡度大于 30%的陡峭坡地不太适宜大豆种植。

3.2 土壤适宜性评价结果

在大豆种植的气候、地形适宜性评价结果的基础上，按照 FAO'90 的农业-土壤适宜性分类系统，根据实地情况和大豆生长对土壤条件的需求，进行土壤清查和土壤适宜性级别标准划分，得到三江平原大豆种植的土壤适宜性分级图，如图 5 所示，相比地形适宜性评价结果，三江平原内大豆种植的适宜性，因土壤条件差异而明显不同。特别是在土壤质地较黏重、排水状况较差的别拉洪河、浓江河以及挠力河的冲积平原上，大豆种植适宜性由非常适宜降为适宜；坡度较大导致过量排水的山区坡地上，其大豆种植适宜性则降为次适宜或边际适宜。

3.3 土地适宜性评价结果

GAEZ 土地评价程序，是按照土地质量随着限制因素逐渐增多，适宜等级递减的原理进行的。本文针对含有对农业生产有限制作用的白浆层的各类土壤，将其适宜性级别降一级处理。在像元(30 m×30 m)尺度上将上述评价结果进行图层叠加，按适宜性最低级附像元值，得到三江平原大豆种植土地适宜性评价结果，如图 6 所示，沿倭肯河、松花江、穆棱河等河流两岸，特别是在平缓(2%~5%)和微起伏(5%~8%)的地区，地形和缓、土壤肥厚、水分充足而排水良好的地区，非常适宜大豆种植；因白浆层限制，其他非常适宜地区则降为适宜或次适宜。

对三江平原大豆种植的农业土地适宜性评价结果，按适宜性等级进行统计分析：非常适宜(S1)和适宜(S2)两级面积约 8.5×10^4 km^2，占三江平原比例达 78.75%(图 7)。

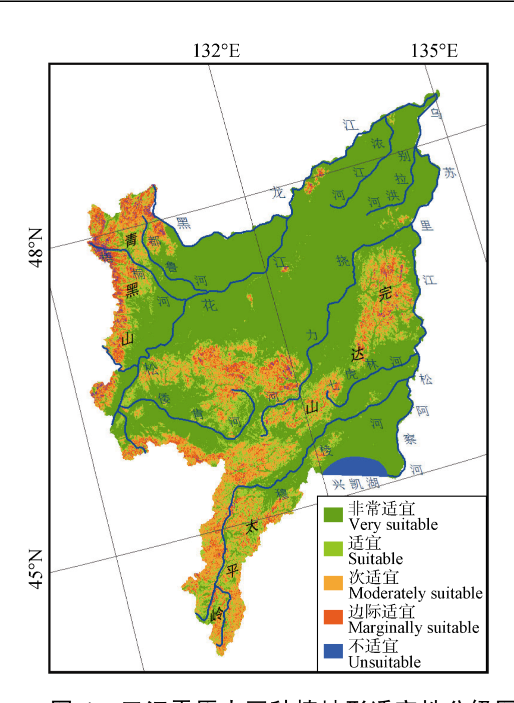


图 4　三江平原大豆种植地形适宜性分级图

Fig. 4　Distribution of suitability class to slope for soybean cultivation in the Sanjiang Plain

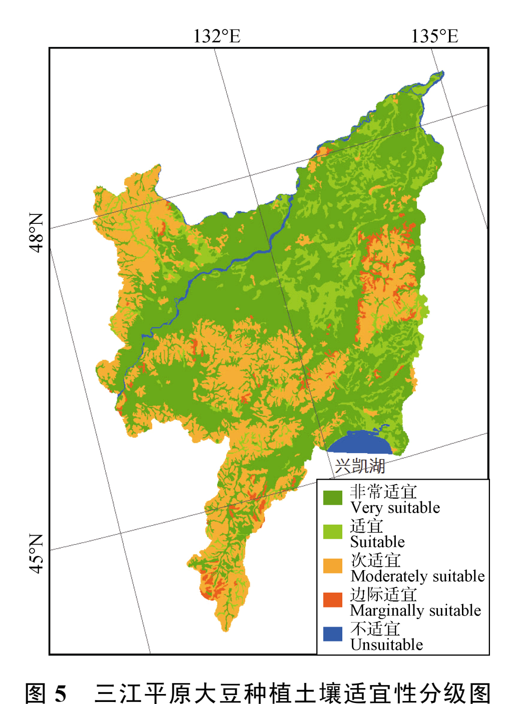


图 5　三江平原大豆种植土壤适宜性分级图

Fig. 5　Distribution of suitability class of soil condition for soybean cultivation in the Sanjiang Plain

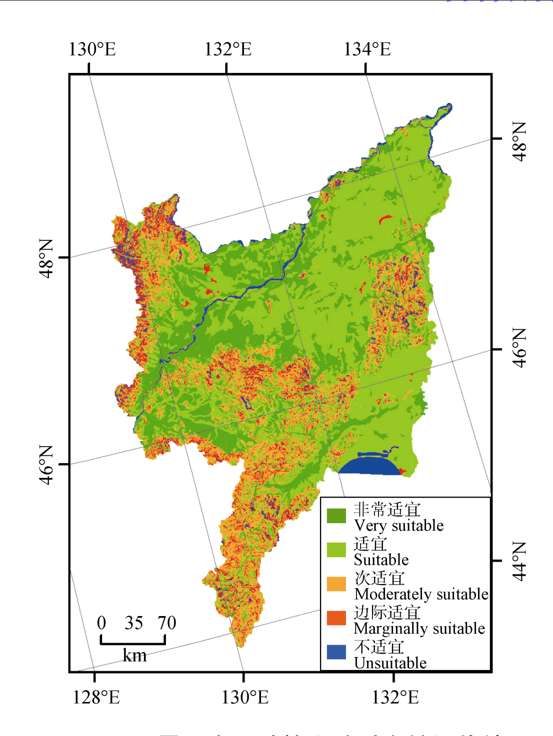


图 6　三江平原大豆种植土地适宜性评价结果

Fig. 6　Distribution of land suitability for soybean cultivation in the Sanjiang Plain

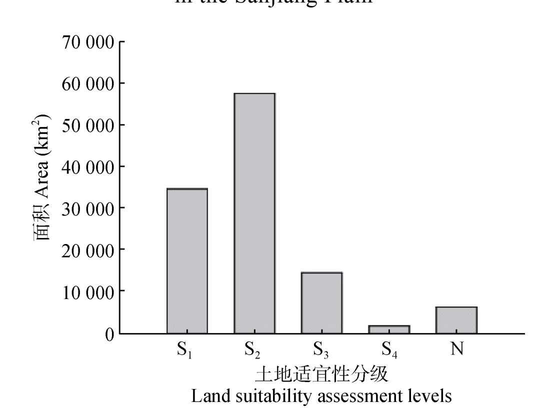


图 7　三江平原大豆种植土地适宜性分级图

Fig. 7　Land suitability levels for soybean cultivation in the Sanjiang Plain

S_1表示非常适宜; S_2表示适宜; S_3表示次适宜; S_4表示边际适宜; N 表示不适宜。S_1: very suitable; S_2: suitable; S_3: moderately suitable; S_4: marginally suitable; N: unsuitable.

3.4　土地适宜度指数统计结果

通过对三江平原 23 个市县计算适宜度指数计算，得到三江平原大豆适宜度指数归一化分级图和统计结果(图 8)。从总体情况来看，三江平原各市县的适宜度归一化指数都超过了 58%，三江平原地区比较适宜发展大豆生产。根据适宜度归一化指数，可将大豆种植区分为 3 类：其中沿倭肯河和松花江分布的勃利、依兰、汤原、佳木斯、集贤、桦川、友谊、绥滨、富锦共 9 个县市的适宜度归一化指数超过 70%，为最适宜大豆种植的县市；同江、桦南、虎林、宝清、抚远、七台河、萝北、鸡东、饶河、双鸭山共 10 个县市的适宜度归一化指数介于 60%~70%；鹤岗、密山、鸡西、穆棱 4 个县市的适宜度归一化指数则介于 58%~60%。

4　讨论与结论

根据 GAEZ 方法中的土地适宜性评价流程，在栅格像元尺度上(30 m×30 m)，对三江平原大豆种植

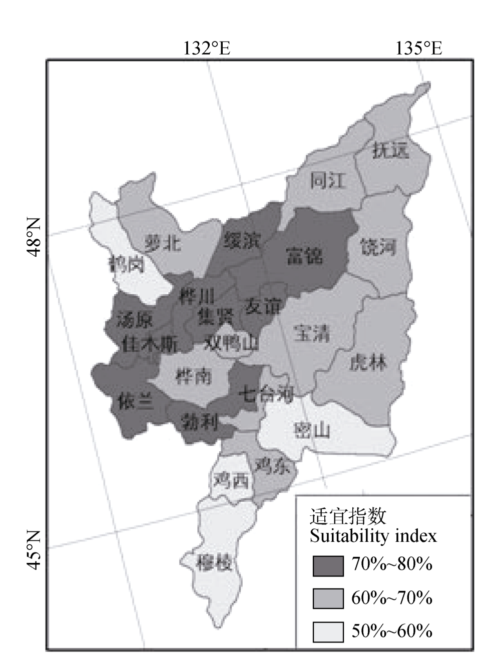


图 8　三江平原大豆种植适宜度指数分县统计

Fig. 8　Land suitability index of soybean planting in counties of the Sanjiang Plain

的土地适宜性进行精细评价, 结果显示:

1)从气候条件来看, 三江平原适宜大豆种植。但因地形、水分条件等因素制约, 如张广才岭、完达山、长白山和小兴安岭余脉坡度大于 30%的陡峭坡地, 大豆种植适宜性降为次适宜或边际适宜。

2)从土壤条件来看, 因土壤质地黏重、排水状况较差或坡度较大导致过量排水的地区, 其大豆种植适宜性则降为次适宜或边际适宜。沿松花江、倭肯河、穆棱河等两岸的平缓(2%~5%)和微起伏(5%~8%)的地区, 最适宜大豆种植。非常适宜和适宜种植面积达 8.5×10^4 km^2, 约占三江平原总面积的 78.75%。

3)从适宜度归一化指数来看: 沿倭肯河和松花江分布的勃利、依兰、汤原、佳木斯、集贤、桦川、友谊、绥滨、富锦共 9 个县市适宜度归一化指数均超过 70%, 为最适宜大豆种植的县市; 其次是同江、桦南、虎林、宝清、抚远、七台河、萝北、鸡东、饶河、双鸭山 10 个县市, 也适宜大豆种植; 最后是鹤岗、密山、鸡西、穆棱 4 个县市, 适宜度一般。

4)从不同区域的空间比较结果来看, GAEZ 方法能够有效地区分大豆种植适宜性的空间差异性, 能够对三江平原大豆种植和区域农业规划提供合理的科学依据。与指标体系评价方法不同, GAEZ 流程化评价程序不仅避免了主观因素的干扰, 评价结果更客观真实, 而且易于不同地区间推广应用和比较。

但是, 为了更为准确地估算三江平原大豆种植的现实土地生产力, 仅靠土地适宜性评价结果来修正大豆种植的气候生产潜力是不够的, 还需考虑当地农地耕种、灌溉比例、农业投入水平和经营管理方法等具体限制条件。碍于搜集到的数据资料限制, 本文未能就三江平原大豆种植的生产力进行评估, 希望今后研究能够进行气候和现实生产力的评估。

致谢　基础数据收集过程中得到地球系统科学数据共享平台(http://www.geodata.cn/)的支持, 在此表示感谢。

参考文献 References

[1] 张振华, 刘志民. 我国大豆供需现状与未来十年预测分析[J]. 大豆科技, 2009(4): 16–21
Zhang Z H, Liu Z M. Predicting the supply and demand of soybean in China in 10 years later[J]. Soybean Science & Technology, 2009(4): 16–21

[2] 蔡承智, van Velthuizen H, Fischer G, 等. 基于 AEZ 模型的我国大豆产量潜力的农作制区划分析[J]. 河南农业科学, 2006, 35(5): 27–31
Cai C Z, van Velthuizen H, Fischer G, et al. Analysis of soybean yield potential based on Chinese farming system zones by AEZ model[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2006, 35(5): 27–31

[3] 张晓峰, 王宏志, 刘洛, 等. 近 50 年来气候变化背景下中国大豆生产潜力时空演变特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1414–1423
Zhang X F, Wang H Z, Liu L, et al. Spatial-temporal characteristics of soybean production potential change under the background of climate change over the past 50 years in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(10): 1414–1423

[4] 孙凤华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 751–755
Sun F H, Yang S Y, Chen P S. Climatic warming-drying trend in northeastern China during the last 44 years and its' effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 751–755

[5] 居煇, 熊伟, 许吟隆, 等. 气候变化对中国东北地区生态与环境的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 345–349
Ju H, Xiong W, Xu Y L, et al. Climate change and its' impacts in Northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4): 345–349

[6] 刘东辉. 主要作物气候适宜性评价指标体系的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1991(4): 9–14
Liu D H. Climatic suitability assessment index of main crops in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1991(4): 9–14

[7] 刘丹, 杜春英, 于成龙. 大豆在黑龙江省的生态适应性及种植格局[J]. 大豆科学, 2008, 27(3): 433–436
Liu D, Du C Y, Yu C L. Ecological adaptability evaluation and planting division of soybean in Heilongjiang Province[J]. Soybean Science, 2008, 27(3): 433–436

[8] 何英彬, 姚艳敏, 李建平, 等. 大豆种植适宜性精细评价及种植合理性分析——以东北三省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(1): 11–17
He Y B, Yao Y M, Li J P, et al. Precisely assessment on soybean growth suitability and analysis on its' cultivation

reasonability — Taking the Northeast China as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012, 33(1): 11–17

[9] 李竑积, 于瑛楠, 李宇光. 基于 GIS 的黑龙江省大豆种植区划分[J]. 科技创新与应用, 2013(2): 212
Li H J, Yu Y N, Li Y G. Soybean planting zonation in Heilongjiang Province based GIS[J]. Technology Innovation and Application, 2013(2): 212

[10] Albersen P, Fischer G, Keyzer M, et al. Estimation of agricultural production relations in the LUC model for China[R]. IIASA RR-02-03. Laxenburg, Austria: IIASA, 2002

[11] Fischer G, van Velthuizen H T, Shah M M, et al. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results[R]. IIASA RR-02-02. Laxenburg, Austria: IIASA, 2002

[12] Liu L, Chen X, Xu X L, et al. Changes in production potential in China in response to climate change from 1960 to 2010[J]. Advances in Meteorology, 2014, 2014: 640320

[13] 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 等. 1990—2010 年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. 地理学报, 2014, 69(12): 1767–1778
Liu L, Xu X L, Liu J Y, et al. Impact of farmland changes on production potential in China during recent two decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1767–1778

[14] 葛亚宁, 刘洛, 徐新良, 等. 近 50a 气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 784–795
Ge Y N, Liu L, Xu X L, et al. Temporal and spatial variations of Chinese maize production potential on the background of climate change during 1960–2010[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 784–795

[15] 周曙东, 赵明正, 陈康, 等. 世界主要粮食出口国的粮食生产潜力分析[J]. 农业经济问题, 2015(6): 91–104
Zhou S D, Zhao M Z, Chen K, et al. Analysis on the potential grain productivity of the world's major grain exporting countries[J]. Issues in Agricultural Economy, 2015(6): 91–104

[16] 赵明正, 朱思柱. 世界玉米潜在出口国玉米生产潜力研究[J]. 世界农业, 2015(9): 121–130
Zhao M Z, Zhu S Z. Analysis on the potential maize productivity of the world's maize exporting countries[J]. World Agriculture, 2015(9): 121–130

[17] 袁兰兰. 近 50 年来气候变化对中国主要农作物土地生产潜力的影响[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015
Yuan L L. Analysis of impact on Chinese main crop's productivity of climate change during 1961–2010[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015

[18] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992
Heilongjiang Land Administrator Agency, Heilongjiang Provincial Office of Soil Survey. Heilongjiang Soil[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992

[19] Kassam A H. Net biomass production and yield of crops[R]. Rome: FAO, 1977

[20] 陈芬. 基于 AEZ/GIS 的福建土地适宜性评价[J]. 福建地理, 2002, 17(3): 11–13
Chen F. Evaluation on the land suitability in Fujian based on AEZ/GIS[J]. Fujian Geography, 2002, 17(3): 11–13

[21] FAO. Agro-ecological zoning and GIS applications in Asia-with special emphasis on land degradation assessment in drylands[R]. Rome: FAO, 2005

[22] Fischer G, Sun L X. Model based analysis of future land-use development in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 85(1/3): 163–176

[23] Fischer G, Shah M M, van Velthuizen H T, et al. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century[R]. Laxenburg, Austria: IIASA, 2001

[24] Fischer G, Shah M, Tubiello F N, et al. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: An integrated assessment, 1990–2080[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 360(1463): 2067–2083

[25] Fischer G, Shah M, van Velthuizen H, et al. Agro-ecological zones assessments[M]//Fischer G, Shah M, van Velthuizen H, et al. Land Use, Land Cover and Soil Sciences. Oxford, UK: EOLSS Publishers, 2006

[26] Fischer G, Granat J, Makowski M. AEZWIN: An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal[R]. IIASA IR-98-051. Laxenburg, Austria: IIASA, 1998

[27] Hudson G, Birnie R V. A method of land evaluation including year to year weather variability[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(2/3): 203–216

[28] 韩湘玲. 作物生态学[M]. 北京: 气象出版社, 1991
Han X L. Crop Ecology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991

[29] 张小川. AEZ 项目概况及研究方法[J]. 中国农业资源与区划, 1992, 13(4): 56–62
Zhang X C. The methodology of AEZ program[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 1992, 13(4): 56–62

[30] 高永刚, 王育光, 南锐, 等. 黑龙江省大豆主栽品种热量指标鉴定及应用[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 200–204
Gao Y G, Wang Y G, Nan R, et al. Identification and application of thermal indexes of main cultivated soybean varieties in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(3): 200–204

[31] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1–17
Wan M W, Liu X Z. Chinese Phenological Observation Method[M]. Beijing: Science Press, 1979: 1–17

[32] 卜坤. 三江平原农业土地生态适宜性评价[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2008: 17–81
Bu K. Agro-ecological land resources evaluation of the Sanjiang Plain[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2008: 17–81

[33] 谢俊奇, 蔡玉梅, 郑振源, 等. 基于改进的农业生态区法的中国耕地粮食生产潜力评价[J]. 中国土地科学, 2004, 18(4): 31–37
Xie J Q, Cai Y M, Zheng Z Y, et al. AEZ-based assessment for food productivity potential of cultivated land in China[J]. China Land Science, 2004, 18(4): 31–37

[34] Arnoldus H M J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco[J]. FAO Soil Bulletin, 1977, 34: 39–51